

TNO-rapport
TM-96-A036

titel

**Visuele en auditieve 3D displays als
ondersteuning bij het opsporen van
doelvliegtuigen**

17

TNO Technische Menskunde

Kampweg 5
Postbus 23
3769 ZG Soesterberg
Telefoon 0346 35 62 11
Fax 0346 35 39 77

auteurs
J.A. Veltman
J.B.F. van Erp
L. van Breda
A.W. Bronkhorst

datum
27 augustus 1996

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

aantal pagina's : 31 (incl. bijlagen,
excl. distributielijst)

19970212 051

DTIC QUALITY INSPECTED 3

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for public release;
Distribution Unlimited

TNO Technische Menskunde is onderdeel
van TNO Defensieonderzoek
waartoe verder behoren:
TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
TNO Prins Maurits Laboratorium



Nederlandse Organisatie voor toegepast-
naturwetenschappelijk onderzoek TNO

REPORT DOCUMENTATION PAGE

1. DEFENCE REPORT NUMBER (MOD-NL) RP 96-0173	2. RECIPIENT'S ACCESSION NUMBER	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER TM-96-A036
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 788.1	5. CONTRACT NUMBER A95/KLu/341	6. REPORT DATE 27 August 1996
7. NUMBER OF PAGES 31	8. NUMBER OF REFERENCES 23	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Interim
10. TITLE AND SUBTITLE Visuele en auditieve 3D displays als ondersteuning bij het opsporen van doelvliegtuigen (Visual and auditory 3D displays as support for locating target jets)		
11. AUTHOR(S) J.A. Veltman, J.B.F. van Erp, L. van Breda and A.W. Bronkhorst		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Human Factors Research Institute Kampweg 5 3769 DE SOESTERBERG		
13. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Director of Airforce Research and Development Binckhorstlaan 135 2516 BA DEN HAAG		
14. SUPPLEMENTARY NOTES		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS, 1044 BYTE) An experiment was conducted in the TNO-TM flight simulator to investigate which manner of information presentation is most effective in helping pilots to locate target jets. Twelve pilots had to follow a target jet that suddenly disappeared and reappeared at a random spot somewhere around the own jet. The task of the pilot was to get the target jet as fast as possible in front of the own jet. They were supported by a 2D or a 3D (perspective) radar display. In half of the conditions, the position of the target jet was also presented by 3D sounds, provided by headphones. To investigate the effects of high visual load upon task performance, the pilots had to perform a visual task together with the flight task in some conditions. To investigate the effects of 3D sound when two sounds are presented, two target jet could be heard in half of the trials. Results show that performance was at best when a 3D perspective radar display was used. 3D sound improved the performance when it was combined with the 2D but not with the 3D radar, probably because performance was already maximal with the 3D display. The performance on the visual task was improved in the conditions with 3D sound, from which can be concluded that more attention is available when a visual radar is supported by a 3D sound system. The combined auditory 3D presentation of two target jets did not affect performance.		
16. DESCRIPTORS 3D Displays Simulators		IDENTIFIERS
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT)	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE)	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT)
18. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Unlimited availability		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES)

titel : Visuele en auditieve 3D displays als ondersteuning bij het opsporen van doelvliegtuigen
auteurs : Drs. J.A. Veltman, drs. J.B.F. van Erp, ing. L. Van Breda en dr. A.W. Bronkhorst
datum : 27 augustus 1996
opdrachtnr. : A95/KLu/341
IWP-nr. : 788.1
rapportnr. : TM-96-A036

Bij TNO Technische Menskunde wordt in opdracht van de Koninklijke Luchtmacht generaliseerbare achtergrondkennis opgebouwd inzake de effecten van geavanceerde interface principes in de cockpit op vliegprestatie, (des)oriëntatie en werklast. Bij dit onderzoek is in de vliegsimulator van TNO-TM nagegaan welke vorm van ondersteuning vliegers het meest helpt bij het zoeken naar doelvliegtuigen. Twaalf vliegers volgden een doelvliegtuig dat plotseling verdween en op een willekeurige plaats rondom het eigen vliegtuig weer opdook. De vliegers moesten zo snel mogelijk het doelvliegtuig recht voor het eigen vliegtuig zien te krijgen. Ze werden hierbij ondersteund door een 2D of een 3D (perspectivisch) visueel radardisplay. Bovendien werd in de helft van de condities de positie van het doelvliegtuig ook auditief, via een hoofdtelefoon weergegeven (3D geluid). Om de gevolgen voor de visuele belasting na te gaan waren er condities waarbij, naast het vliegen, een visuele taak moest worden uitgevoerd. Om de effecten van 3D geluid na te gaan wanneer er twee geluiden gelijktijdig worden aangeboden waren er condities met één of met twee doelvliegtuigen, waarvan er telkens één moest worden opgespoord.

De resultaten lieten zien dat er met het 3D visuele display het best werd gepresteerd. Het 3D geluid verbeterde de prestatie als het werd gecombineerd met het 2D maar niet met het 3D visuele display, waarschijnlijk omdat er bij het 3D visuele display al maximaal werd gepresteerd. In condities met 3D geluid werd er beter gepresteerd op de visuele neventaak, wat betekent dat er meer aandacht voor visuele taken beschikbaar is als een visueel radar wordt ondersteund met 3D geluid. Het gelijktijdig aanbieden van twee geluiden via de hoofdtelefoon had geen gevolgen voor de prestatie.

INHOUD	Blz.	
SAMENVATTING	5	
SUMMARY	6	
1 INLEIDING	7	
1.1 Achtergrond	7	
1.2 Het experiment	10	
1.3 Verwachte resultaten	10	
2 METHODE	11	
2.1 Proefpersonen	11	
2.2 Simulator	11	
2.3 Taak en condities	13	
2.4 2D en 3D visuele radar displays	14	
2.5 3D auditief display	15	
2.6 Procedure	16	
2.7 Analyse	17	
3 RESULTATEN	18	
3.1 Prestatie op de vliegtaak	18	
3.2 Prestatie op de neventaak	21	
3.3 Inspanning	22	
4 DISCUSSIE	23	
5 CONCLUSIES	24	
REFERENTIES	25	
BIJLAGE 1	Technische specificaties van de TNO-TM vliegsimulator	27
BIJLAGE 2	Beoordelings-Schaal Mentale Inspanning (BSMI, Zijlstra, 1993)	29
BIJLAGE 3	Volgorde waarin de taakcondities zijn aangeboden	30
BIJLAGE 4	Posities waarop het doelvliegtuig werd geplaatst bij de condities met één target	31

Rapport nr.: TM-96-A036

Titel: Visuele en auditieve 3D displays als ondersteuning bij het opsporen van doelvliegtuigen

Auteurs: Drs. J.A. Veltman, drs. J.B.F. van Erp, ing. L. van Breda en dr. A.W. Bronkhorst

Instituut: TNO Technische Menskunde
Afd.: Vaardigheden

Datum: augustus 1996

DO Opdrachtnummer: A95/KLu/341

Nummer in MLTP: 788.1

SAMENVATTING

In de vliegsimulator van TNO TM is nagegaan welke vorm van informatie-presentatie vliegers het meest helpt bij het zoeken naar doelvliegtuigen. Twaalf vliegers volgden een doelvliegtuig dat plotseling verdween en op een willekeurige plaats rondom het eigen vliegtuig weer opdook. De vliegers moesten zo snel mogelijk het doelvliegtuig recht voor het eigen vliegtuig zien te krijgen. Ze werden hierbij ondersteund door een 2D of een 3D (perspectivisch) visueel radardisplay. Bovendien werd in de helft van de condities de positie van het doelvliegtuig ook auditief, via een hoofdtelefoon weergegeven (3D geluid). Om de gevolgen voor de visuele belasting na te gaan waren er condities waarbij, naast het vliegen, een visuele taak moest worden uitgevoerd. Om de effecten van 3D geluid na te gaan wanneer er twee geluiden gelijktijdig worden aangeboden waren er condities met één of met twee doelvliegtuigen, waarvan er telkens één moest worden opgespoord.

De resultaten lieten zien dat er met het 3D visuele display het best werd gepresteerd. Het 3D geluid verbeterde de prestatie als het werd gecombineerd met het 2D maar niet met het 3D visuele display, waarschijnlijk omdat er bij het 3D visuele display al maximaal werd gepresteerd. In condities met 3D geluid werd er beter gepresteerd op de visuele neventaak waaruit kan worden afgeleid dat er meer aandacht voor visuele taken beschikbaar is als een visueel radar wordt ondersteund met 3D geluid. Het gelijktijdig aanbieden van twee 3D geluiden via de hoofdtelefoon had geen nadelige gevolgen voor de prestatie.

Visual and auditive 3D displays as support for locating target jets

J.A. Veltman, J.B.F. van Erp, L. van Breda and A.W. Bronkhorst

SUMMARY

An experiment was conducted in the TNO-TM flight simulator to investigate which manner of information presentation is most effective in helping pilots to locate target jets. Twelve pilots had to follow a target jet that suddenly disappeared and reappeared at a random spot somewhere around the own jet. The task of the pilot was to get the target jet as fast as possible in front of the own jet. They were supported by a 2D or a 3D (perspective) radar display. In half of the conditions, the position of the target jet was also presented by 3D sounds, provided by headphones. To investigate the effects of high visual load upon task performance, the pilots had to perform a visual task together with the flight task in some conditions. To investigate the effects of 3D sound when two sounds are presented, two target jet could be heard in half of the trials.

Results show that performance was at best when a 3D perspective radar display was used. 3D sound improved the performance when it was combined with the 2D but not with the 3D radar, probably because performance was already maximal with the 3D display. The performance on the visual task was improved in the conditions with 3D sound, from which can be concluded that more attentions is available when a visual radar is supported by a 3D sound system. The combined auditive 3D presentation of two target jets did not affect performance.

1 INLEIDING

1.1 Achtergrond

De informatievoorziening in de cockpit van gevechtsvliegtuigen verbetert in hoog tempo. Dit betreft niet alleen een toename van de hoeveelheid aangeboden informatie, maar ook de kwaliteit van de informatie. Dit is van belang voor een efficiënte functievervulling in de cockpit. Zo is het voor de vlieger niet alleen belangrijk te weten waar zich vriendschappelijke en vijandelijke eenheden bevinden, het is ook noodzakelijk dat hij op de hoogte is van de eigen mogelijkheden en van de vijandelijke bedoelingen. Volgens Schwartz en Adams (1987) is voor het verwerven van die informatie tijd de kritische factor. De informatievoorziening in de cockpit heeft tot taak de vlieger daarin te ondersteunen, bijvoorbeeld door relevante informatie verdergaand te integreren of zo inzichtelijk mogelijk te visualiseren (Schwartz & Adams, 1987; Passenier, 1994; Korteling, Van Gent & Van der Borg, 1995). Tegen deze achtergrond wordt bij TNO Technische Menskunde (TNO-TM) in opdracht van de Koninklijke Luchtmacht (KLu) onderzoek verricht naar geavanceerde cockpit informatiesystemen (A95/KLu/341) waarbij wordt nagegaan hoe missie-relevante informatie zo efficiënt mogelijk aan de vlieger kan worden aangeboden. In het kader van die opdracht wordt onder andere kennis verzameld over besturingsmiddelen, over effecten van verschillende vormen van anticipatie (Korteling & Van Gent, 1993), en over visuele en auditieve displays als hulp bij het onderscheppen van een doelvliegtuig (Van Breda & Veltman, 1995, 1996; Veltman, Van Breda & Bronkhorst, 1994). In het onderhavige rapport wordt een experiment besproken waarin de mogelijkheden van een verbeterd 3D auditief display in de cockpit worden onderzocht, in combinatie met 2D of 3D visuele informatie.

De taak van de gevechtsvlieger bestaat naast management taken uit een aantal specifieke taken. Voorbeelden hiervan zijn nавигieren, communiceren en het peilen van doelen. De vlieger leidt op basis van waargenomen positie- en oriëntatie-verandering het vermoedelijk verloop van de baan van het doelvliegtuig af. In het huidige experiment worden twee hulpmiddelen ter ondersteuning van de vliegtaak nader onderzocht: visuele en auditieve displays. Bij *visuele* ondersteuning worden technieken aangewend om het verticale situatie display (pitch, roll, heading, elevation) en het horizontale situatie display (vluchtpad van het vliegtuig geprojecteerd op geografische en tactische informatie) gecombineerd weer te geven. Deze vorm van presentatie wordt ook wel het "virtual world" principe genoemd. Bij *auditieve* ondersteuning wordt een bepaalde geluidomgeving voor de vlieger gecreëerd, waarbij geluid, al dan niet gecodeerd, zodanig wordt aangeboden dat deze voor de vlieger vanuit een bepaalde richting wordt waargenomen. Vooral omdat in gevechtssituaties een juiste oriëntatie van de vlieger ten opzichte van een (vaak onzichtbaar) doel van groot belang is, kan een dergelijke vorm van ondersteuning de kans op detectie bij het opsporen van doelen vergroten. Deze vorm van presentatie wordt ook wel "virtual acoustics" genoemd.

Tijdens gevechtssituaties heeft de gevechtsvlieger te maken met een hoge werkbelasting doordat veel taken gelijktijdig en onder een hoge tijdsdruk moeten worden uitgevoerd. De informatie die in een dergelijke situatie moet worden verwerkt wordt vooral visueel aangeboden. Dit voortdurend gericht zijn op visuele informatiemiddelen dwingt de vlieger deze informatie op een inefficiënte manier te verwerken. Bij het huidige onderzoek wordt daarom de vraag gesteld in hoeverre de vliegtaak verbetert wanneer de visuele informatie

geïntegreerd wordt aangeboden en als de vlieger daarnaast ook de beschikking heeft over een 3D auditief display. Het gaat daarbij om een specifieke vliegtaak: het onderscheppen van een doelvliegtuig in een zogenaamde "dog fight" situatie. De gevolgen van het 3D visuele en auditieve display voor de prestatie en mentale werkbelasting tijdens operationele missies waarbij de management aspecten van de taakuitvoering een grote rol spelen kunnen met deze studie niet worden bepaald.

Op het gebied van visuele ondersteuning bij doel-acquisitie was eerder onderzoek gericht op de effectiviteit van perspectivische radar displays. Daarbij werd nagegaan in hoeverre perspectivische radarbeelden bevorderlijk zijn voor de egocentrische oriëntatie van de vlieger, dat wil zeggen de positiebepaling van andere objecten in de ruimte in relatie tot de eigen positie (Van Breda & Veltman, 1995). Vooral in een zogenaamde "dog fight" situatie, waarbij het gevechtsvliegtuig in principe te maken heeft met één ander (vijandelijk) vliegtuig, is het cruciaal dat de vlieger goed geïnformeerd is omtrent positie en vlieggedrag van het doelvliegtuig. Om het doelvliegtuig te kunnen onderscheppen wordt de vliegrichting van het eigen vliegtuig zo snel en zo nauwkeurig mogelijk in de richting van het doelvliegtuig gebracht. De beste zoekstrategie kenmerkt zich dan door het instellen van een zodanige rolhoek dat de "lock on" alleen nog maar een kwestie is van "positief G-trekken". Een juiste egocentrische oriëntatie is in dat geval *essentieel*. In een simulator experiment hadden vliegers de beschikking over een tactisch display en een situatiedisplay (radarbeeldscherm). Het tactisch display was een (ego-centrisch) perspectivische afbeelding van de omgeving met een beperkte zichthoek in de vliegrichting. Een dergelijk display is vooral geschikt voor ondersteuning bij het volgen van een gepland traject. Men spreekt dan van *local guidance* (Wickens, 1986). Het radarbeeld daarentegen was een (exocentrisch) perspectivische afbeelding van het luchtruim, d.w.z. de vlieger keek als het ware vanuit een willekeurig (vast) punt naar het luchtruim en naar de verrichtingen van het eigen vliegtuig (Prevett & Wickens, 1994). Deze informatie is vooral geschikt voor het lokaliseren van doelen, een taak die *global awareness* vereist (Aretz, 1991; Aretz & Wickens, 1992; Haskel & Wickens, 1993). Stokes, Wickens en Kite (1990) geven aan dat een perspectivisch display beter werkt naarmate de situatie meer dynamisch is en er voldoende perspectivische cues aanwezig zijn. De vormgeving en het dynamisch gedrag van het door TNO-TM ontwikkelde radarbeeld voldeden hier goed aan, waardoor de vlieger zeer goed in staat was het effect van de eigen stuurhandelingen in te schatten (anticiperen). Uit het experiment bleek dat dit vooral het geval was wanneer het display was uitgevoerd met zogenaamde inside-out bewegingsreferentie, dat wil zeggen dat bij verandering van pitch en roll de afbeelding van de buitenwereld roteert, terwijl de eigen vliegtuigreferenties stabiel blijven. Het beeld is dan compatibel met het door de vlieger waargenomen omgevingsbeeld en toont bovendien dezelfde relatieve bewegingen van objecten in de ruimte. Het eigen vliegtuig is de referentie en de buitenwereld draait daar als het ware omheen. De met deze display configuratie gevuldge zoekstrategie bleek zeer goed, ongeacht de richting waarin het doelvliegtuig zich bevond. Ten opzichte van een conventioneel 2D radarbeeld bleek de acquisitietijd vrijwel gehalveerd. Een aanvullend experiment (Van Breda & Veltman, 1996) bevestigde deze resultaten; zelfs het toevoegen van predictie-informatie over de vliegrichting van doelen leverde geen verkorting van de acquisitietijd op.

Op het gebied van auditieve ondersteuning werd eveneens een experiment uitgevoerd (Veltman, Van Breda & Bronkhorst, 1994). De studie was exploratief van aard en betrof onderzoek naar de effectiviteit van een zogenaamd auditief display in de cockpit. De proefpersonen moesten in een vliegsimulator een doelvliegtuig onderscheppen en werden daarbij ondersteund met een visueel en een auditief display. Het visueel display toonde elementaire 2D positie-informatie van het doelvliegtuig, het auditieve display voorzag de vlieger via de hoofdtelefoon van 3D akoestische signalen uit de richting waarin het doelvliegtuig zich bevond (Bronkhorst, 1995). Dit 3D auditieve display bevat digitale filters die het effect van hoofd en oren op inkomend geluid simuleren, en zodoende een richtingssensatie teweeg brengen. De filters zijn gebaseerd op akoestische overdrachtsfuncties van geluidbron naar gehoorgang, welke voor diverse richtingen werden gemeten (HRTF's, Head-Related Transfer Functions). Om met het auditieve display een vaste, aan de buitenwereld gekoppelde, richting te kunnen weergeven, diende rekening te worden gehouden met de oriëntatie van het hoofd van de luisteraar. Hier toe werd een head tracker gebruikt, gemontereerd op de hoofdtelefoon. Het niveau van het geluidssignaal was een functie van de afstand tot het doelvliegtuig; het niveau nam toe naarmate de afstand kleiner werd.

Uit de resultaten bleek dat doelacquisitie sneller ging wanneer de vlieger werd ondersteund met doel-informatie van zowel een radarbeeld als een 3D auditief display. Analyse gaf evenwel aan dat de snellere zoektijden met het 3D auditieve display niet afhankelijk waren van de positie waarop het doelvliegtuig zich bevond. Omdat de auditieve cues het duidelijkst zijn wanneer het geluid van opzij komt was verwacht dat het effect van 3D geluid maximaal zou zijn wanneer het doelvliegtuig zich links of rechts van het eigen vliegtuig bevond. Dat deze verwachting niet door de resultaten werd ondersteund komt waarschijnlijk doordat de vliegers, wanneer zij onzeker waren over de richting van het geluid, kleine hoofdbewegingen en/of bewegingen van het eigen vliegtuig maakten die hen voldoende auditieve cues opleverden om de correcte positie van het doelvliegtuig te achterhalen. Bijvoorbeeld, het verschil tussen voor en achter werd met een kleine horizontale hoofdbeweging duidelijker (nee-schuddende beweging); het verschil tussen boven en onder door het hoofd van de ene naar de andere schouder te bewegen of door het eigen vliegtuig een kleine roll te laten maken. Tenslotte bleek uit de werklastscore dat het toevoegen van het 3D auditieve display geen hogere of lagere werklast tot gevolg had.

Opgemerkt dient te worden dat het bij dit laatste experiment ging om een eerste ontwikkeling op het gebied van akoestische displays. Zo was het bijvoorbeeld noodzakelijk dat voor iedere proefpersoon de volledige akoestische overdrachtsfuncties werd bepaald in een echovrije ruimte waarbij voor 967 invalsrichtingen metingen werden gedaan (resolutie ca. 5°). Dit duurde ca. 2.5 uur, hetgeen door de proefpersonen als zeer belastend werd ervaren.

Er zijn inmiddels nieuwe ontwikkelingen op het gebied van auditieve displays. Zo is het niet langer noodzakelijk om voor iedere persoon de individuele akoestische overdrachtskarakteristiek op te meten. Om de belasting voor de proefpersonen in het huidige onderzoek te minimaliseren is gebruik gemaakt van een aantal standaard overdrachtsfuncties die zijn afgeleid uit metingen bij 10 (andere) proefpersonen. Bij elke proefpersoon werd een luistertest verricht om de meest geschikte overdrachtsfuncties te selecteren. Op basis van een pilot-onderzoek verricht bij vijf instituutsmedewerkers werd verwacht dat met de standaard overdrachtsfuncties een redelijk tot goede geluidlokalisatie kon worden gerealiseerd.

Het huidige onderzoek gaat in op deze vraag en richt zich op de toepassing van het verbeterd auditief display in combinatie met een perspectivisch visueel display, mogelijk leidend tot een nog efficiënter zoekgedrag van jachtvliegers.

1.2 Het experiment

Om na te gaan in hoeverre het verbeterd auditief display in combinatie met een visueel display helpt bij het onderscheppen van doelvliegtuigen, werd een simulatorexperiment uitgevoerd. Een vlieger diende in eerste instantie een vliegtuig op vaste afstand te volgen, waarna deze op een onverwacht moment uit het zicht verdween en (tijdloos) op een willekeurige positie rond het eigen vliegtuig werd geplaatst. De vlieger had de opdracht het doelvliegtuig zo snel mogelijk op te sporen door het eigen vliegtuig weer in de richting van het doelvliegtuig te manoeuvreren. De volgende taakonderdelen werden gevarieerd: radarbeeld (2D vs 3D), 3D geluid (wel of niet), aantal target vliegtuigen (1 of 2) en visuele neventaak (wel of niet). Dit leverde in totaal 16 ($2 \times 2 \times 2 \times 2$) condities op die gebalanceerd werden aangeboden.

De tijd tussen het verdwijnen en het weer opsporen van het doelvliegtuig, en de gevolgde zoekstrategie, werden gebruikt als maat voor de kwaliteit van de taakuitvoering. Daarnaast werd bepaald hoe efficiënt de vlieger het doelvliegtuig benaderde door na te gaan hoe goed de neus van het eigen vliegtuig onder het doelvliegtuig werd gehouden. Om na te gaan of de verschillende vormen van ondersteuning ook invloed hebben op de mentale werklast werd na elke conditie gevraagd hoeveel inspanning er was geleverd om het doelvliegtuig te lokaliseren.

Ten behoeve van de navigatie was de cockpit uitgerust met een geïntegreerd tactisch display voor gecombineerde presentatie van verticaal en horizontaal situatie display. Hierop werd een gestileerd omgevingsbeeld getoond met daarin tactische informatie, bijvoorbeeld dreigingsgebieden en doelvliegtuigen. De toestandsvariabelen zoals speed, altitude, heading en pitch waren afleesbaar in een Head-Up Display (HUD), voor dit onderzoek geprojecteerd in het buitenbeeld. Hierin werd ook de visuele neventaak gepresenteerd.

1.3 Verwachte resultaten

Op basis van voorgaande experimenten (Veltman, Van Breda & Bronkhorst, 1994; Van Breda & Veltman, 1995, 1996) wordt verwacht dat er met het 3D perspectivisch radarbeeld beduidend beter wordt gepresteerd dan met een 2D radarbeeld en dat het 3D geluid met name een verbetering laat zien als het wordt gecombineerd met het 2D radarbeeld. De prestatie met het 3D radarbeeld waren in voorgaande experimenten dermate goed dat niet wordt verwacht dat het toevoegen van 3D geluid een grote verbetering oplevert. Door de visuele neventaak moet de aandacht verdeeld worden tussen het buitenbeeld en het tactisch display waardoor verwacht wordt dat de zoekijd toe zal nemen. Het 3D geluid zal dit effect kunnen verminderen omdat auditieve informatie goed is te combineren met visuele informatie (Wickens, 1984). Dit effect is mogelijk ook terug te vinden in de prestatie op de neventaak, die verwacht wordt met 3D geluid beter te zijn. Van het aantal targets is de verwachting niet duidelijk; enerzijds kunnen proefpersonen beter presteren omdat de positie

voor het verwisselen al bekend is, anderzijds kan het gelijktijdig aanbieden display clutter veroorzaken, waardoor er slechter wordt gepresteerd. De Verwachte resultaten staan samengevat in Tabel I.

Tabel I Samenvatting van verwachte uitkomsten van de vier bij het experiment gemanipuleerde factoren en de interactie met 3D geluid.

factor	hoofdeffect	interactie met 3D geluid
2D radarbeeld vs 3D radarbeeld	met 3D radarbeeld kortere zoektijden	3D geluid: effect bij 2D radarbeeld groter dan bij 3D radarbeeld
geen geluid vs 3D geluid	met 3D geluid kortere zoektijden	—
1 target vs 2 targets	?	?
geen neventaak vs neventaak	zonder neventaak kortere zoektijden	met 3D geluid betere prestaties op vlieg- en neventaak dan zonder 3D geluid

2 METHODE

2.1 Proefpersonen

Aan het experiment hebben in totaal 12 proefpersonen deelgenomen. De leeftijden lagen tussen de 22 en 31 met een gemiddelde van 26. Tien proefpersonen, waarvan twee vrouwen, waren helikopter vlieger en twee (mannen) waren voormalig waarnemer met veel ervaring in het helikopter vliegen.

2.2 Simulator

Instrumentatie

Het experiment werd uitgevoerd met de TNO-TM vliegsimulator. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van de simulator-opstelling. Voor gedetailleerde technische specificaties wordt verwezen naar Bijlage 1.

De simulator is opgebouwd uit de volgende elementen:

- beeldgeneratie- en projectiesysteem;
- geïnstrumenteerde mockup van een cockpit;
- computersystemen voor berekening van het dynamisch gedrag van het eigen vliegtuig en van het doelvliegtuig.

Beeldgeneratie- en projectiesysteem

Voor het genereren en presenteren van dynamische buitenbeelden werd een Evans & Sutherland ESIG-2000 grafische processor gebruikt met daaraan gekoppeld een Seos HiView projectiesysteem. Het ESIG-2000 systeem genereert meerdere parallelle videobeelden. Er is gebruik gemaakt van een drie-kanaals configuratie, met een oplossend vermogen van 800×600 beeldpunten per kanaal, een opfrisfrequentie van 30 Hz. en een beeldhoek van 156° horizontaal en 42° verticaal.

De beelden werden geprojecteerd met een Seos PRODAS HiView S-600 projectiesysteem. Dit projectiesysteem wordt gekenmerkt door een sferisch projectiescherm en een set videoprojectoren. Het projectiescherm is opgesteld rondom een mockup van de cockpit van een gevechtsvliegtuig. De afstand van de vlieger in de cockpit tot het projectiescherm bedraagt ongeveer 3 m.

Geïnstrumenteerde mockup van een cockpit

De mockup van de cockpit is een op ware grootte nagemaakte model van de cockpit van een gevechtsvliegtuig. Deze cockpit was evenwel gedeeltelijk geïnstrumenteerd. Alleen de voor de vliegtaak primair noodzakelijke voorzieningen waren aanwezig. Naast een NF-5 stoel voor de vlieger was er voor besturing alleen een throttle en een force-stick voor bediening van respectievelijk voorwaartse snelheid en roll cq. pitch. Ten behoeve van de navigatie was de cockpit uitgerust met een geïntegreerd tactisch display. Hierop werd informatie over de toestand van het eigen vliegtuig en tactische informatie getoond. Langs de randen van het scherm bevonden zich toestandsindicatoren voor hoogte, voorwaartse snelheid, verticale snelheid, koers en spoilerstand. De snelheid en de koers werd ook in een geprojecteerd head up display (HUD) weergegeven. Hierin was ook de stand van het eigen vliegtuig zichtbaar in de vorm van een pitch ladder. Tevens werd de neventaak links in de HUD geprojecteerd (zie § 2.3).

Tactische informatie bestond uit een perspectivische afbeelding van de buitenwereld: een rasterstructuur voor landschappen en een kruis-symbool voor het doelvliegtuig (zie Fig. 1). Het kruis-symbool was alleen zichtbaar indien het doelvliegtuig binnen 10° voor het eigen vliegtuig vloog. Het radar bestond uit een 2D of een 3D beeld, deze worden in § 2.5 nader besproken.

Configuratie van de computersystemen

In de simulator werden meerdere computersystemen toegepast met elk een specifieke taak:

- berekenen van het dynamisch gedrag van het eigen gevechtsvliegtuig en van andere vliegtuigen (rekenfrequentie 30 Hz);
- scenario-generatie;
- presenteren van gegevens op een tactisch situatie display;
- presenteren van geluiden met een 3D-auditief display;
- ruwe gegevensverwerking en gegevensopslag van de door de proefpersoon uitgevoerde handelingen en manoeuvres.

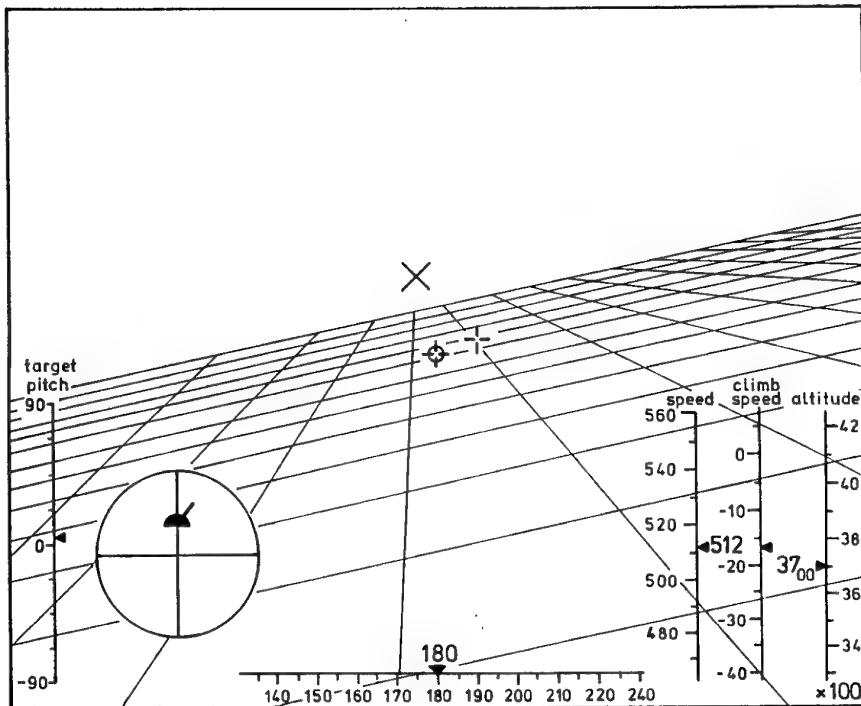


Fig. 1 Overzicht van het tactisch display met een 2D radar. Het kruis-symbool in het midden van het display geeft de richting aan waar het doelvliegtuig zich bevindt. Het symbool was alleen zichtbaar als het doelvliegtuig zich binnen een hoek van 10° bevond.

Vliegmodel

Het wiskundig model voor het berekenen van het vlieggedrag was gebaseerd op een zes-graden-vrijheid model van een F-16 gevechtsvliegtuig (Schuring, 1983a). Dit model werd verkregen door linearisatie van een uitgebreid F-16 aërodynamisch model (Schuring, 1983b) en gevalideerd aan de hand van werkelijke vluchtgegevens (Van der Geest, 1985).

2.3 Taak en condities

De taak van de proefpersoon was het doelvliegtuig zo snel mogelijk binnen een hoek van 10° voor het eigen vliegtuig te krijgen en vervolgens zo lang mogelijk binnen die hoek te houden. Bij het opsporen van het doelvliegtuig kregen alle proefpersonen de volgende vormen van ondersteuning:

- 2D visueel
- 2D visueel en 3D geluid
- 3D visueel
- 3D visueel en 3D geluid.

Bij elk type ondersteuning werden 4 verschillende sessies gevlogen van elk 20 trials: één of twee target vliegtuigen en met of zonder een visuele neventaak. Een overzicht van de condities is in Tabel II weergegeven.

In de condities met één doelvliegtuig versprong deze om de 20 s naar een nieuwe positie op 10.000 ft van het eigen vliegtuig (zie Bijlage 4). Vanaf deze positie vloog het doelvliegtuig van het eigen vliegtuig vandaan met een snelheid van 450 kts. De pitch van het doelvliegtuig was gelijk aan de verticale hoek waaronder het doelvliegtuig werd geplaatst. In de condities met twee doelvliegtuigen moest er telkens één doelvliegtuig worden gevuld. Dit vliegtuig had op de radar een rode kleur; de kleur van het andere vliegtuig was wit. Deze kleuren werden om de 20 s verwisseld. In de condities met 3D geluid werden de posities van de doelvliegtuigen met een gepulseerd tonaal signaal aangegeven. Voor het te volgen toestel werd een signaal met een relatief hoge pitch en snelle herhalingsfrequentie gebruikt. Bij twee doelvliegtuigen werd het tweede toestel door een langzamer gepulseerd signaal met een lage pitch aangegeven. Het te volgen vliegtuig (rood) vloog vanaf het moment van wisselen van het eigen vliegtuig weg met een snelheid van 450 kts. Het andere vliegtuig (wit) vloog met een snelheid van 900 kts, waarbij het eigen vliegtuig werd gevuld. Omdat de snelheid van het doelvliegtuig veel groter was dan van het eigen vliegtuig, vloog het doelvliegtuig regelmatig voorbij waarna deze draaide en weer richting het eigen vliegtuig vloog. De positie van het tweede toestel was continu beschikbaar op het visuele radar en in het 3D geluid. Hierop konden de proefpersonen voor het verwisselen van de targets anticiperen.

Tabel II Overzicht van de 16 condities. (- betekent afwezig en + betekent aanwezig.)

visueel	2D				3D			
3D geluid	-		+		-		+	
aantal targets	1	2	1	2	1	2	1	2
neventaak	-	+	-	+	-	+	-	+

Neventaak

De neventaak die in de helft van de condities moest worden uitgevoerd bestond uit een marker die langs een verticale schaal bewoog, links in de HUD. De marker had een witte kleur en werd rood als het in het onderste of bovenste deel van de schaal verscheen. De proefpersoon werd opgedragen zo snel mogelijk, na het rood worden van de marker, een knop op de side stick in te drukken.

2.4 2D en 3D visuele radar displays

De 2D radar bestond uit een cirkel rond het eigen vliegtuig (zie Fig. 2). De positie van doelvliegtuig werd door middel van een halve cirkel in de radar weergegeven. Bij een afstand groter dan 15.000 ft werd het doelvliegtuig op de rand geplaatst. De elevatie hoek ten opzichte van de horizon werd met behulp van een indicator links van de radar weergegeven.

geven. In de condities met twee doelvliegtuigen had het te volgen doelvliegtuig een rode en het andere vliegtuig een witte kleur. Deze kleuren werden ook gebruikt bij de overeenkomstige markers op de pitch indicator.

Het 3D radar bestond uit een bolvormige representatie van het luchtruim rondom het eigen vliegtuig (Van Breda & Veltman, 1995). De positie van het doelvliegtuig werd door middel van een stip op de rand van de bol weergegeven. De afstand tot het doelvliegtuig werd op een indicator links van de bol weergegeven. Evenals in de condities met één doelvliegtuig, had het te volgen vliegtuig een rode kleur en het andere vliegtuig een witte kleur. Het vlak horizontaal door het eigen vliegtuig werd weergegeven met een groene cirkel en het vlak door de horizon met een blauwe cirkel. De bol was opgebouwd uit pixels die boven het horizon-vlak blauw waren gekleurd en onder het horizon-vlak bruin. Vóór het eigen vliegtuig was een lijntje getekend loodrecht op de cirkel van het vliegtuigvlak dat dienst deed als vizier; het doelvliegtuig was recht voor het eigen vliegtuig indien het zich op de kruising van dit lijntje en de groene cirkel bevond.

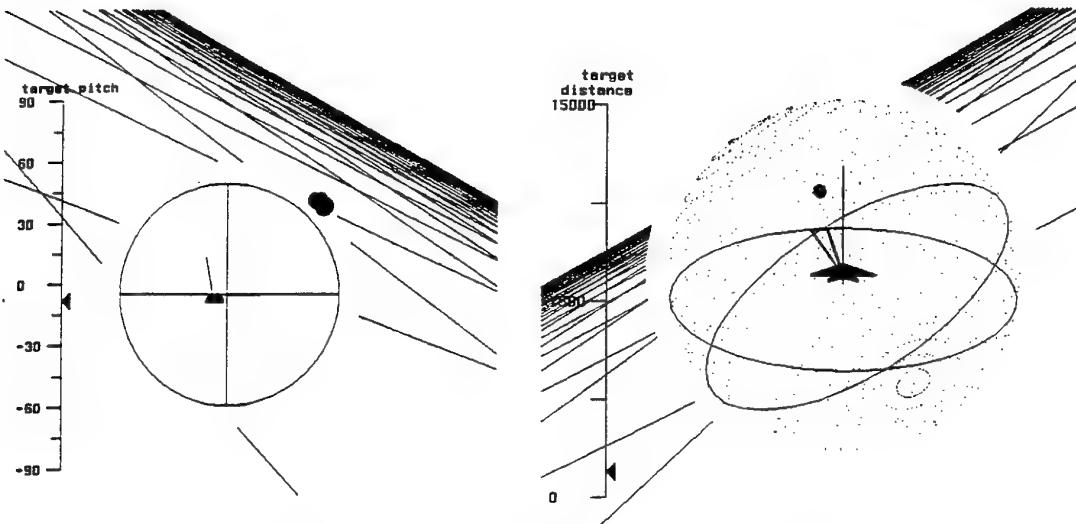


Fig. 2 Overzicht van de gebruikte 2D en 3D visuele radardisplays.

2.5 3D auditief display

Het 3D auditieve display komt in hoofdlijnen overeen met het systeem dat beschreven is in Bronkhorst (1995) en Veltman e.a. (1994). Het hart wordt gevormd door een digitale signaalprocessor die de geluidssignalen voor beide oren convoluteert met digitale filters. De filters zijn zodanig ontworpen dat zij de akoestische effecten van hoofd en oren, waarop het richtinghoren gebaseerd is, simuleren. In eerdere versies is gebruik gemaakt van filters die direct zijn afgeleid van akoestische metingen in de gehoorgangen van de proefpersonen. Hiervoor was gekozen omdat bekend is dat deze metingen grote inter individuele verschillen te zien geven, die ook gevolgen hebben voor de geluidlokalisatie. Onderzoek heeft aangegetoond dat geluidlokalisatie met een 3D auditief display vrijwel altijd verslechtert als niet van de "eigen" metingen gebruik wordt gemaakt.

In het eerdere experiment was echter gebleken dat de (vrij langdurige) akoestische metingen als belastend werden ervaren. Omdat inmiddels voortgang was gemaakt met de statistische analyse van de akoestische metingen, en het mogelijk bleek filters te construeren die een inter- of extrapolatie zijn van metingen bij individuele proefpersonen, werd besloten voor het huidige experiment gebruik te maken van berekende filters. Voor de berekeningen werd uitgegaan van metingen die in 1995 bij 10 proefpersonen (20 oren) zijn verricht. Het verschil met voorgaande metingen, zoals o.a. beschreven in Bronkhorst (1995), is dat gebruik is gemaakt van nieuwe probe-microfoons, met een tip van zacht siliconenrubber, die tot op minder dan 1 mm van het trommelvlies kunnen worden ingebracht. Zodoende werd een betere representatie van de hoge frequenties (> 10 kHz) verkregen dan bij de eerder gebruikte afstand van 3 mm.

De metingen voor de 20 oren werden middels datareductietechnieken, gevolgd door een principale componenten analyse, geprojecteerd op 3 dimensies. Ieder punt in deze ruimte correspondeert met een volledige set akoestische overdrachtsfuncties voor alle geluidsrichtingen. In deze ruimte werd een grid van $3 \times 3 \times 3$ punten geconstrueerd die ongeveer hetzelfde volume omspannen als de 20 meetpunten. Middels een luistertest werden voor elke proefpersoon uit de 27 punten 2 geselecteerd (voor het linker en rechter oor) die de beste geluidlokalisatie gaven. Deze punten, die dus ieder een set artificiële filters voor willekeurige geluidsrichtingen representeren, werden in het vliegsimulatie-experiment gebruikt.

De positie van het te volgen doelvliegtuig werd aangegeven met een gepulste complexe toon bestaande uit 41 gelijkmataig gespatieerde harmonische componenten met een grondfrequentie van 360 Hz. De herhalingsfrequentie van de toon was 12 Hz. Tussen afstanden van 12.000 en 2000 ft nam het niveau van de toon toe met 15 dB. In de condities met een tweede doelvliegtuig werd dit vliegtuig met een andere (lagere) toon aangegeven: deze had een grondfrequentie van 210 Hz, 71 componenten en een herhalingsfrequentie van 7 Hz.

2.6 Procedure

De proefpersonen namen in paren twee achtereenvolgende dagen deel aan het experiment. Beide ochtenden en een deel van de middagen werden besteed aan het huidige experiment; in de resterende tijd namen de proefpersonen deel aan een ander vliegexperiment. De eerste ochtend werd gebruikt voor training. De proefpersonen vlogen dan eerst ca. 30 min. vrij om te wennen aan het vlieggedrag. Vervolgens vlogen ze om beurten vier sessies met telkens een andere vorm van ondersteuning bij het zoeken van het doelvliegtuig (2D, 2D met geluid, 3D en 3D met geluid). Binnen deze sessies werd gevlogen met één en twee doelvliegtuigen, met en zonder neventaak. Tijdens de training was de tijd tussen het verspringen van de targets 30 s.

Voordat er met 3D geluid werd gevlogen werd eerst bepaald met welke instelling van het 3D auditieve display de beste geluidlokalisatie werd verkregen. Daarvoor werd een luistertest uitgevoerd, gebaseerd op het verwisselingsexperiment beschreven in Bronkhorst (1995). De test maakt gebruik van posities van virtuele geluidsbronnen in acht gebieden: de vier kwadranten (links/rechts voor en links/rechts achter) doorsneden door het horizontale vlak ter hoogte van de oren. De taak van de proefpersoon was het identificeren van het gebied

waarin de geluidsbron zich bevond, zonder dat er hoofdbewegingen konden worden gemaakt. De antwoorden konden via een toetsenbord worden aangegeven.

Voor elk van de 27 instellingen kreeg de proefpersoon drie geluidstimuli uit de 8 gebieden te horen. De volgorde van de stimuli was gerandomiseerd. De stimuli waren ruisstoten met een duur van 1 s en een spectrum dat gemiddeld vlak was maar dat bij iedere aanbieding binnen $\frac{1}{3}$ octaven random niveafluctuaties van maximaal ± 5 dB vertoonde. Deze fluctuaties werden aangebracht om te voorkomen dat de proefpersonen hun antwoorden baseerden op de klankkleur (geluid dat van achteren komt klinkt bijvoorbeeld wat doffer) en niet op de geluidrichting. Gescoord werd voor welke instelling het hoogste percentage correcte antwoorden werd verkregen. Stimuli aan de rechter zijde werden gebruikt om de instelling voor het rechter oor te bepalen en stimuli aan de linker zijde voor het linker oor.

In een pilot-onderzoek was de verwisselingstest bij vijf instituutsmedewerkers afgenoem. Hierbij werd een gemiddelde score van 67.6% voor de beste instelling verkregen, die gunstig afstak bij de scores van 50–60% die bij het in Bronkhorst (1995) beschreven experiment optrad. (Voor dit experiment waren individuele metingen van overdrachtsfuncties verricht, maar bleef een grote discrepantie aanwezig tussen resultaten voor virtuele en echte bronnen: bij de laatste werd een score van 80% gehaald.) De resultaten voor de proefpersonen bleken echter lager te liggen: de gemiddelde score voor de beste instelling was 55%. Dit betekent dat de nauwkeurigheid van lokalisatie van virtuele bronnen zonder hoofdbewegingen ongeveer op het niveau lag van het eerste experiment, maar nog steeds achter blijft bij het theoretisch haalbare niveau.

Tijdens de experimentele dag vlogen de proefpersonen dezelfde vier sessies als tijdens de training (2D, 2D met geluid, 3D en 3D met geluid). Binnen een sessie werd wederom gevlogen met één en twee doelvliegtuigen en met en zonder neventaak. De volgorde van de condities werd gebalanceerd (zie Bijlage 3) om eventuele leer- of vermoeidheidseffecten tijden het experiment uit te kunnen middelen. De tijd tussen het verspringen van de doelvliegtuigen bedroeg nu 20 s. Het aantal trials bedroeg 20 per conditie. Na elke conditie verscheen een inspanningslijst (BSMI, zie Bijlage 2) waarop moest worden aangegeven hoe inspannend men de afgelopen 20 trials vond. Deze schaal is uit eerder onderzoek geschikt gebleken als maat voor mentale werkbelasting (Veltman & Gaillard, 1993). De volgende 20 trials werden automatisch, na het geven van de inspanningsscore, gestart.

2.7 Analyse

Bij het experiment zijn de volgende maten geanalyseerd:

zoektijd:	De tijd tussen het verspringen van het doelvliegtuig en het weer binnen 10° krijgen. In de gevallen waarbij het doelvliegtuig niet binnen 20 s werd opgespoord is een zoektijd van 20 s ingevuld.
tracking error:	Root Mean Square (RMS) van de hoek tussen het verticale vlak op de langs-as van het eigen vliegtuig en het vlak door het doelvliegtuig en de langsas van het eigen vliegtuig. Bij een lage tracking error wordt een effectief pad gevlogen.

% niet gevonden:	Percentage van de trails waarbij het doelvliegtuig niet binnen 20 s binnen 10° werd gekregen.
BSMI score:	Score op de inspanningsschaal.
reactietijd neventaak:	Tijd tussen het rood worden van de marker en het indrukken van de knop.
missers neventaak:	Aantal keren niet geregistreerd op de neventaak.

De resultaten zijn met behulp van een ANOVA volgens een "herhaalde meting design" getoetst (Statistica, V5.0) met vier factoren met elk twee niveaus:

1 display:	2D versus 3D
2 3D geluid:	wel en geen geluid
3 aantal doelvliegtuigen:	één of twee doelen
4 neventaak:	wel of geen neventaak

Om na te gaan of de mogelijke effecten van het 3D geluid afhangen van de positie waarop het doelvliegtuig verscheen, is een verdeling gemaakt van trails waarbij het doelvliegtuig links of rechts verscheen en waarbij het vliegtuig voor of achter verscheen. Deze initiële posities zijn berekend ten opzichte van de stand van het eigen vliegtuig op het moment van het verschijnen van het doelvliegtuig. Bij de opdeling zijn de volgende horizontale hoeken (α) betrokken (recht voor het eigen vliegtuig is $\alpha=0$).

links of rechts: $-135^\circ < \alpha < -45^\circ$ en $45^\circ < \alpha < 135^\circ$

voor of achter: $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ en $\alpha > 135^\circ$ en $\alpha < -135^\circ$

Voor de verticale hoek (β) geldt: $-45^\circ < \beta < 45^\circ$, waarbij $\beta < 0$ de posities onder en $\beta > 0$ de posities boven het eigen vliegtuig.

3 RESULTATEN

3.1 Prestatie op de vliegtaak

De zoektijden en tracking error voor de onderzochte condities zijn weergegeven in Fig. 3. Voor beide variabelen is een hoofdeffect gevonden voor display, aantal targets en neventaak. De resultaten van de statistische toetsen zijn weergegeven in Tabel III, met daarin alleen de hoofdeffecten en de eerste orde interacties. Hogere interacties zijn niet interessant en worden niet beschouwd. De resultaten laten zien dat de zoektijden en de tracking error bij het 3D visuele display aanzienlijk beter zijn dan bij het 2D display. De zoektijden in de condities met twee targets zijn langer dan in de condities met één target. Ook de neventaak heeft een negatieve invloed op de zoektijden. De invloed van het 3D geluid komt naar voren in de interactie tussen display en 3D geluid bij de zoektijd en een hoofdeffect bij de tracking error. Bij het 2D display wordt de zoektijd verbeterd en bij het 3D visuele display iets verslechterd bij toevoeging van 3D geluid. Om na te gaan hoe de significante interactie tussen display type en 3D geluid tot stand is gekomen, zijn de effecten van 3D geluid met behulp van een planned comparison onderzocht bij het 2D en 3D display afzonderlijk. Uit deze analyse blijkt dat de prestatie verbetering bij het 2D display na toevoeging van 3D geluid significant is [$F(1,11)=5,21; p<0.05$]. Bij het 3D display is de prestatie verslechtert significant.

ring na toevoeging van het 3D geluid niet significant [$F(1,11)=1,07; p=0.32$]. Voor zowel het 2D als het 3D visuele display geldt dat het toevoegen van het 3D geluid leidt tot een kleinere tracking error.

De langere zoektijden bij twee targets wordt veroorzaakt doordat het tweede vliegtuig vaker achter dan voor zit, hetgeen langere zoektijden tot gevolg heeft. De reden hiervan is de relatieve snelheid van het tweede vliegtuig ten opzichte van het eigen vliegtuig. Als het tweede vliegtuig achter het eigen vliegtuig zit, is de relatieve snelheid 450 kts (900–450 kts) en als deze voor zit 1350 kts (900+450 kts). Het duurt dus veel langer om van achter naar voren te komen dan omgekeerd. Op het moment van wisselen is de kans dat het tweede vliegtuig achter zit daardoor groter dan de kans dat deze voor zit. Uit de analyses blijkt dat de initiële positie van het target vliegtuig in 87% van de gevallen achter was en in 13% van de gevallen voor. Bij de condities met één doelvliegtuig is de verdeling vóór/achter gelijk. Voor de tracking error is er een significante interactie tussen visueel display en aantal targets. Met een planned comparison is deze interactie nader onderzocht. De tracking error bij twee doelvliegtuigen is kleiner dan bij één target vliegtuig bij het 3D visueel display [$F(1,11)=23,9; p<0.001$]. Bij het 2D display is er geen verschil tussen het aantal doelvliegtuigen [$F(1,11)=0,001; p=0.94$]. De oorzaak voor de kleinere tracking error bij twee doel vliegtuigen bij het 3D visuele display heeft zeer waarschijnlijk óók te maken met het vlieggedrag van het tweede vliegtuig. Omdat deze zich meestal achter het eigen vliegtuig bevindt, maakt daardoor een kleine hoek ten opzichte van het verticale vlak door het eigen vliegtuig. Bij het 3D visuele display wordt het doelvliegtuig zo goed mogelijk in het verticale vlak gehouden, waardoor de tracking error klein blijft. Proefpersonen maken een loopng om het doelvliegtuig voor zich te krijgen. Met een 2D display wordt anders gevlogen dan met een 3D visueel display (zie ook Van Breda e.a., 1995). Er wordt hierbij in twee fasen gevlogen; eerst wordt er langs de horizon gevlogen om een goede heading te krijgen en vervolgens wordt de pitch veranderd om het doelvliegtuig voor te krijgen. Tijdens deze eerste fase verschijnt het doelvliegtuig links of rechts van het eigen vliegtuig en maakt daardoor een grote hoek ten opzichte van het verticale vlak, en dus een grotere tracking error.

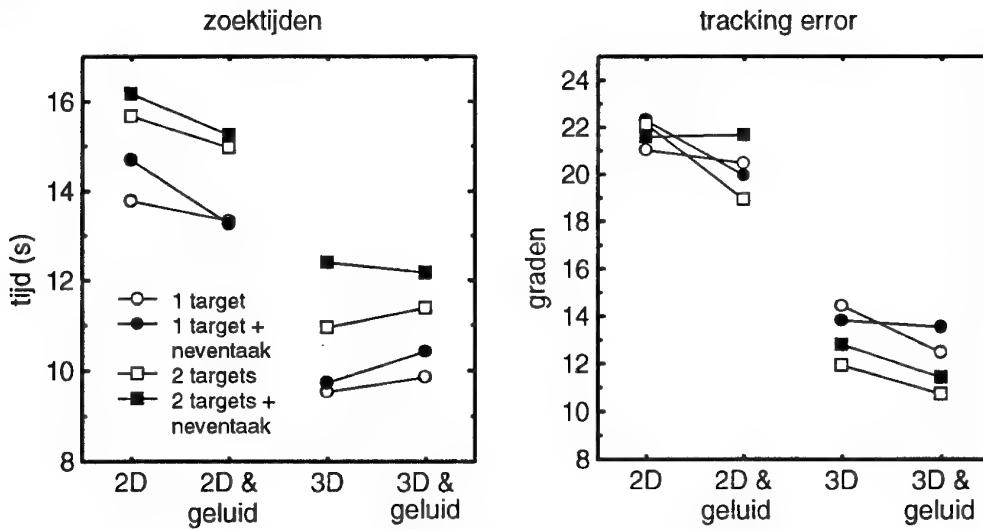


Fig. 3 Zoektijden en tracking errors uitgesplitst naar type display, geluid, aantal targets en neventaak.

Tabel III Resultaten van de statistische analyses.

effect	zoektijd <i>F</i> (1,11)	tracking error <i>F</i> (1,11)
1: visueel display	164,8***	258,1***
2: 3D geluid	n.s.	7,8*
3: aantal targets	233,1***	7,2*
4: neventaak	11,15**	n.s.
1×2	6,9*	n.s.
1×3	n.s.	6,7*
1×4	n.s.	n.s.
2×3	n.s.	n.s.
2×4	n.s.	n.s.
3×4	9,7*	n.s.

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; n.s. niet significant

Om na te gaan of de effecten van het 3D geluid afhangen van de initiële positie van het doelvliegtuig, zijn de trials waarbij het doelvliegtuig links of rechts verscheen vergeleken met de trials waarbij het doelvliegtuig voor of achter verscheen. Hierbij is tevens een opsplitsing gemaakt naar type display omdat deze variabele bij de eerste analyse een groot effect vertoonde. De resultaten laten zien (Fig. 4 en Tabel IV) dat het 3D geluid met name effect heeft indien het doelvliegtuig links of rechts verschijnt (interactie geluid × positie). Het sterke effect van de factor positie op de tracking error wordt veroorzaakt door de definitie van de tracking error. Indien het doelvliegtuig links of rechts verschijnt is deze hoek groot vergeleken met het voor of achter verschijnen van het doelvliegtuig.

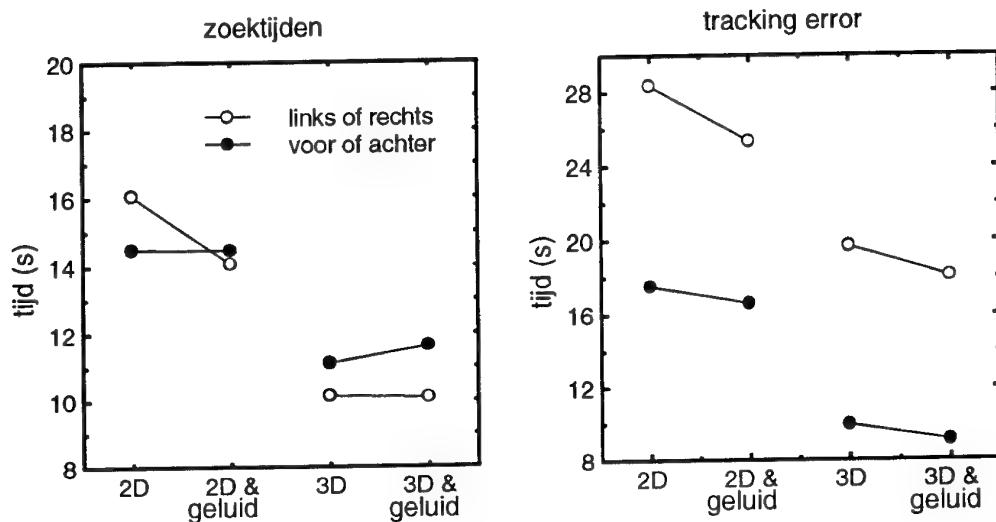


Fig. 4 Zoektijd en tracking error opgesplitst naar initiële positie van het doelvliegtuig, opgesplitst naar display type en 3D geluid.

Tabel IV Resultaten van de statistische analyses naar het effect van positie van het doelvliegtuig op het moment van verschijnen.

effect	zoektijd $F(1,11)$	tracking error $F(1,11)$
1: display	193,2***	280,3***
2: geluid	n.s.	14,2*
3: positie	n.s.	738,8***
1×2	6,9*	n.s.
1×3	32,3***	n.s.
2×3	21,4***	12,9**

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$

De percentages trials waarbij het doelvliegtuig niet werd opgespoord zijn weergegeven in Fig. 5. Bij het 3D display is de score duidelijk beter dan bij het 2D display [$F(1,11) = 81,2$; $p < 0.001$]. Het 3D geluid heeft tot gevolg dat het percentage niet gevonden doelvliegtuigen bij het 2D display duidelijk lager wordt, bij het 3D display is het percentage al zo laag dat het 3D geluid hier weinig meer kan verbeteren [interactie display × geluid: $F(1,11) = 4,8$, $p < 0.05$].

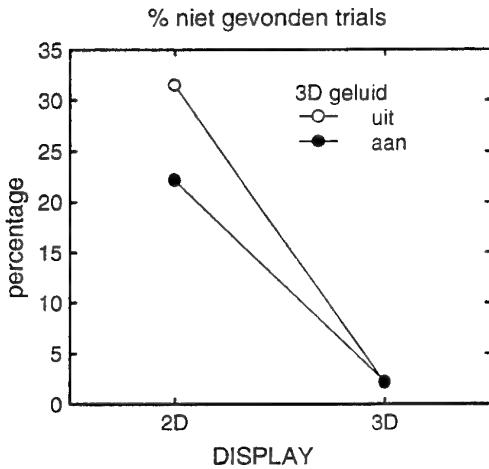


Fig. 5 Percentage van de trials waarvan het doelvliegtuig niet binnen de duur van een trial werd opgespoord, opgesplitst naar display type en geluid.

3.2 Prestatie op de neventaak

Van de neventaak zijn de reactietijden en het aantal missers bepaald. In Fig. 6 zijn de resultaten weergegeven, opgesplitst naar display type en geluid. De reactietijden vertoonden alleen een trend in het effect van display type ($p < 0.06$). Bij het percentage missers was het effect van display type en de aan- of afwezigheid van 3D geluid significant [$F(1,11) = 11,0$, $p < 0.01$; $F(1,11) = 6,7$, $p < 0.05$ respectievelijk]. Bij het 3D display waren er minder missers dan bij het 2D display. Het percentage missers werd verder verminderd door toevoeging van

3D geluid. Het 3D geluid heeft dus positieve gevolgen voor de tweede taak bij zowel het 2D als het 3D visuele display.

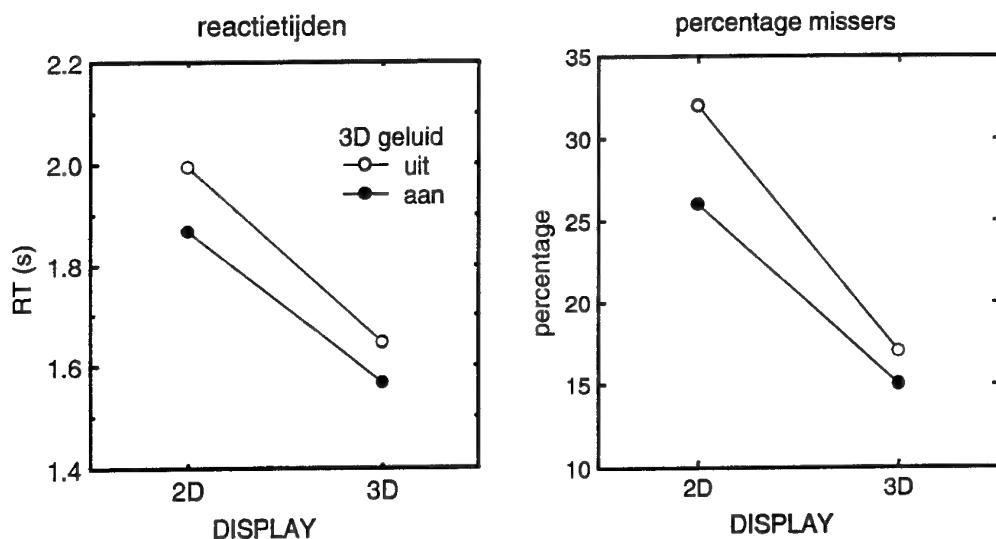


Fig. 6 Reactietijden en percentage missers op de neventaak opgesplitst naar display type en geluid.

3.3 Inspanning

De inspanningsscores zijn weergegeven in Fig. 7, opgesplitst naar display type en geluid. Uit de analyse van de inspanningsscores blijkt alleen een significant verschil tussen het 2D en 3D visueel display [$F(1,11)=27,3$, $p<0.001$]. Bij het 2D visueel display was de gemiddelde inspanningsscore 64 (tussen "tamelijk" en "behoorlijk" inspannend) en bij het 3D display 45 (tussen "enigszins" en "tamelijk" inspannend).

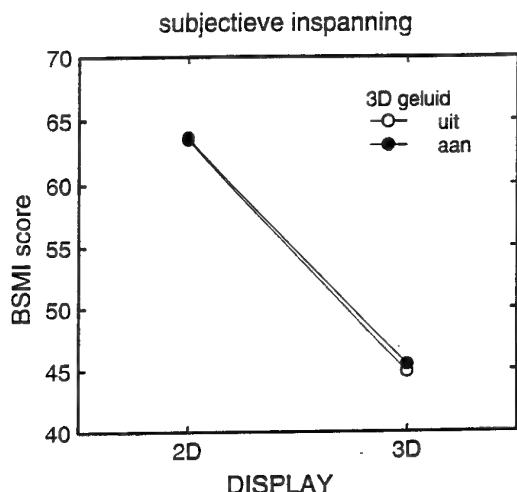


Fig. 7 Subjectieve inspanningsscores, opgesplitst naar display type en geluid.

4 DISCUSSIE

De effecten van 3D geluid en van een 3D perspectivisch display zijn in eerdere experimenten onafhankelijk van elkaar onderzocht (Veltman e.a., 1994 en Van Breda e.a., 1995). In het huidige experiment zijn effecten van auditieve en visuele 3D informatie in combinatie onderzocht en is nagegaan welke gevolgen een hogere visuele werklast heeft en de aanwezigheid van twee in plaats van één doelvliegtuig.

2D versus 3D visueel display

De beste prestatie werd verkregen wanneer de positie van het doelvliegtuig in een 3D visueel radarbeeld werd weergegeven in plaats van in een 2D radarbeeld; de zoektijden waren met het 3D display ruim 25% korter dan met het 2D display. Dit percentage is een conservatieve schatting omdat bij de trials die niet binnen de maximum tijd van 20 s werden gevonden de waarde 20 is ingevuld. Bij het 2D display was het aantal niet op tijd gevonden doelvliegtuigen beduidend hoger (26% bij het 2D display en 2% bij het 3D display). Dit positieve effect van het 3D visuele display werd niet beïnvloed door het aantal doelvliegtuigen of de aanwezigheid van een tweede visueel belastende taak. Deze resultaten zijn vergelijkbaar met het eerder uitgevoerde experiment (Van Breda e.a., 1995). Uit de inspanningsscores en uit de prestatie op de visuele neventaak bleek dat het zoeken met het 3D visuele display minder aandacht vergde dan het zoeken met het 2D display. De prestatie op de neventaak was bij het 3D visuele display aanzienlijk beter dan bij het 2D display, wat met name tot uiting kwam in het aantal missers; bij het 2D display werden 29% van de rode markers gemist en bij het 3D display 16%. In praktijksituaties kan dit van grote betekenis zijn omdat bij een dog fight maar weinig aandacht overblijft voor het bewaken van de toestand van het eigen vliegtuig. Indien de vlieger op een efficiënte manier positie-informatie krijgt blijft er meer aandacht over voor het bewaken van de toestand van het eigen vliegtuig.

3D geluid

Het gevonden effecten ten gevolge van het 3D geluid zijn kleiner dan de effecten van het 3D visuele display ten opzichte van het 2D visuele display. De effecten zijn wel duidelijk betekenisvol. In combinatie met het 2D display werd de gemiddelde zoektijd met 6% verminderd, trad een kleinere tracking error op en verbeterde de prestatie op de neventaak (zowel bij de reaktietijden als de percentage missers). De lagere zoektijden traden met name op wanneer het doelvliegtuig links of rechts van het eigen doelvliegtuig verscheen. Dat dit effect wel in deze studie werd gevonden maar niet in de vorige (Veltman e.a., 1994) heeft waarschijnlijk te maken met de grotere betrouwbaarheid van de huidige resultaten. Bij het eerste experiment werd vereist dat het op te sporen vliegtuig vrij langdurig in het vizier werd gehouden (5 seconden). Dit had echter tot gevolg dat er soms extreem lange zoektijden optradën omdat het doel te vroeg uit het vizier verdween en weer opnieuw opgezocht moest worden. Bij het huidige experiment was het voldoende om het doelvliegtuig in het vizier te krijgen en werden bovendien meer trials afgenummerd.

In combinatie met het 3D visuele display leverde het 3D geluid geen verbetering van de zoektijd op, maar wel een lagere tracking error en een betere prestatie op de neventaak. De resultaten op de neventaak tonen aan dat er met 3D geluid meer aandacht overblijft voor

andere (visuele) taken. Bij toevoeging van een tweede doelvliegtuig trad geen verandering op van het effect van 3D geluid. Dit geeft aan dat het weergeven van een tweede 3D geluid via de hoofdtelefoon geen gevolgen heeft voor het bijhouden van de positie van het doelvliegtuig. De vraag of vliegers gelijktijdig de positie van twee doelvliegtuigen kunnen bijhouden, kan met de gebruikte onderzoeksopzet niet worden beantwoord. Dit zal een vervolgonderzoek moeten uitwijzen.

Hoewel de resultaten een gunstig effect van 3D geluid aangeven waren de subjectieve ervaringen van de proefpersonen in het algemeen minder positief, zeker in vergelijking met het eerste experiment waarin 3D geluid werd toegepast. Een van de redenen hiervoor is waarschijnlijk dat het 3D visuele display een veel groter effect had dan het 3D geluid. Daarnaast heeft de gebruikte methode voor het aanpassen van het auditieve display waarschijnlijk een rol gespeeld. De kwaliteit van de geluidlokalisatie die werd verkregen bleef toch nog duidelijk achter bij het theoretisch haalbare. Het percentage goed gelokaliseerde geluiden met de beste filters voor elke proefpersoon was tijdens de testfase voor het bepalen van de filters lager dan bij eerdere metingen. In de praktijk bleek bijvoorbeeld dat wanneer het doelvliegtuig zich voor het eigen vliegtuig bevond, deze vaak achter werd gehoord. De resultaten geven dan ook aan dat er voorlopig nog niet aan individuele aanpassing middels akoestische metingen bij de persoon in kwestie ontkomen kan worden. Daarnaast dient aandacht gegeven te worden aan het verdere ontwerp van het auditieve display, met name de keuze van de signalen. Bedacht dient te worden dat de vorm en lay-out van het 3D visuele display in hoge mate geoptimaliseerd zijn, maar dat een dergelijke uitontwikkeling nog niet bij het 3D auditieve display heeft plaatsgevonden.

De gevonden resultaten zijn in lijn met onderzoek uitgevoerd door Begault e.a. (1993, 1996). Zij hebben de effecten van 3D geluid in een full mission simulator onderzocht. Hierbij moesten vliegers tijdens een gesimuleerde lijnvlucht andere vliegtuigen detecteren. Uit beide experimenten bleek dat de detectie sneller ging als de positie op een visueel radar werd ondersteund met 3D geluid. De auteurs concludeerden dat er met 3D geluid meer aandacht overblijft voor andere visuele taken.

5 CONCLUSIES

- Door presentatie van een doelvliegtuig in een 3D perspectivisch radardisplay wordt de zoekprestatie fors verbeterd ten opzichte van een 2D radardisplay.
- 3D geluid verbetert de zoekprestatie als het wordt gecombineerd met een 2D visueel display.
- Voor beide onderzochte visuele displays hebben vliegers meer aandacht beschikbaar voor andere visuele taken als het visuele display wordt ondersteund met 3D geluid.
- Het gelijktijdig aanbieden van twee doelvliegtuigen in het visuele radar en met 3D geluid heeft geen gevolgen voor de prestatie.

REFERENTIES

Aretz, A.J. (1991). The design of electronic Map Displays. *Human Factors*, 33(1), 85-101.

Aretz, A.J. & Wickens, C.D. (1992). The mental rotation on map displays. *Human Performance*, 5(4), 303-328.

Begault, D.R. (1993). Head-Up auditory displays for traffic collision avoidance system advisories: A preliminary investigation. *Human Factors*, 35(4), 707-717.

Begault, D.R. & Pittman, M.T. (1996). Three-dimensional audio versus head-down traffic alert and collision avoidance system displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 6(1), 79-93.

Breda, L. van & Veltman, J.A. (1995). *3D grafische informatie in de cockpit als hulp bij het opsporen van doelvliegtuigen* (Rapport TNO-TM 1995 A-37). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Breda, L. van & Veltman, J.A. (1996). *Helpt predictie-informatie in de cockpit bij het opsporen van doelvliegtuigen?* (Rapport TM-96-A021). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Bronkhorst, A.W. (1995). *Audiodisplays in de cockpit; ontwikkeling en evaluatie van een 3D-audiodisplay* (Rapport TNO-TM 1995 A-50). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Geest, P.J. van der (1985). *Validation of the F-16 computer simulation program with aid of actual flight test results* (Memorandum VS-85-025 C). Amsterdam: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.

Haskell, I.D. & Wickens, C.D. (1993). Two- and Three-dimensional displays for aviation: A theoretical and empirical comparison. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), 87-109.

Korteling, J.E. & Gent, R.N.H.W. van (1993). *Anticipatie en actieve stuurmiddelen bij helikopterbesturing* (Rapport IZF 1993 A-2). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO¹.

Korteling, J.E., Gent, R.N.H.W. van & Borg, W. van der (1995). *Visuele informatiepresentatie in gevechtsvliegtuigen* (Rapport TNO-TM 1995 A-2). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Passenier, P.O. (1994). *Tactische situatie schermen: Ontwikkelingen in de cockpit* (Rapport TNO-TM 1994). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Prevet, T.T. & Wickens, C.D. (1994). *Perspective displays and frame of reference: their interdependence to realize performance advantages over planar displays in a terminal area navigation task* (Technical report ARL-94-8/NASA-94-3). Moffett Field, CA: NASA Ames Research Center.

Schuring, J. (1983a). *Introduction to the control and display software for the NLRGC human centrifuge* (Memorandum VS-83-014 L). Amsterdam: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.

Schuring, J. (1983b). *Computer simulation of aircraft dynamics applied for the F-16. Part II: Description of program package ACT, Edition 1983* (NLR report TR 80027 C). Amsterdam: Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium.

¹ Op 1 januari 1994 werd de naam "Instituut voor Zintuigfysiologie TNO" vervangen door "TNO Technische Menskunde".

Schwartz, N. & Adams, E. (1987). Panoramic cockpit control and display system (PCCADS). *Proceedings AGARD-CP-425 (Supp.): The machine interface in Tactical Aircraft Design and Combat Automation*. Stuttgart, BRD: NATO.

Statistica (1994). *Handbook*. Statsoft Inc.

Stokes, A., Wickens, C.D. & Kite, K. (1990). *Display technology: Human Factors concept*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

Veltman, J.A. & Gaillard, A.W.K. (1993). *Evaluation of subjective and physiological measurement techniques for pilot workload* (Rapport IZF 1993 A-5). Soesterberg: Instituut voor Zintuigfysiologie TNO.

Veltman, J.A., Breda, L. van & Bronkhorst, A.W. (1994). *Informatievoorziening in de cockpit: opsporen van andere vliegtuigen met behulp van een 3D audio display* (Rapport TNO-TM 1994 A-32). Soesterberg: TNO Technische Menskunde.

Wickens, C.D. (1984). Processing resources in attention. In R. Parasuraman & D.R. Davies (Eds.), *Varieties of Attention* (pp. 63-102). Orlando, FL: Academic Press.

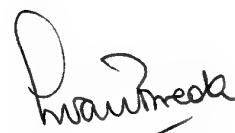
Wickens, C.D. & Prevett, T.T. (1995). Exploring the dimensions of egocentricity in aircraft navigation displays. *Journal of Experimental Psychology*, 1(2), 110-135.

Zijlstra, F.R.H. (1993). *Efficiency in Work Behaviour: A design approach for modern tools*. Thesis. Technical University of Delft.

Soesterberg, 27 augustus 1996



Drs. J.A. Veltman
(1^e auteur)



Ing. L. van Breda
(projectleider)

BIJLAGE 1 Technische specificaties van de TNO-TM vliegsimulator

BEELDGENERATIESYSTEEM

Fabrikaat:	Evans & Sutherland, type ESIG-2000
Principe:	computer gegenereerde beelden
Aantal kanalen:	maximaal 4
Resolutie:	1,0 M beeldelementen per kanaal bij 30 Hz (3 kanalen) 0,5 M beeldelementen per kanaal bij 60 Hz (3 kanalen)
Beeldhoek:	programmeerbaar
Aantal polygonen:	1500 à 2000 polygonen/kanaal bij 30 Hz afhankelijk van de configuratie, 1000 polygonen/kanaal bij 60 Hz
Kleur:	1024 basiskleuren exclusief texture en shading effecten
Hidden surface removal:	op basis van Binary Separation Planes (BSP)
Shading:	smooth, flat, Gouraud shading
Anti-aliasing:	ja, niet door transparante polygonen
Bewegende objecten:	maximaal 252 onafhankelijke objecten
Lag time:	2½ update cycle + 1 refresh cycle. Bij 30 Hz update en 60 Hz refresh is dat 100 ms, bij 60 Hz update is dat 58 ms
Texturing:	maximaal 256 (128×128) texture maps (4,2 Mtexel); oor near/far effecten kunnen maximaal 4 maps per polygoon worden aangebracht. Dynamische texturing mogelijk
Atmosferische omstandigheden:	dag, nacht, schemer, onweer
Level of detail:	automatisch, overload management
Puntlichtbron:	ja
Line of sight ranging/laser ranging:	ja
Collision detection:	ja
Terrein interactie:	ja, maximaal 40 punten
Flir:	ja
Animatie:	ja
Graphics overlay:	wordt in het beeld gemengd door middel van video-keying
Video-output:	volledig programmeerbaar
Modelleren:	EaSIEST modelleer software op ESV/3 werkstation.

BEELDPROJECTIESYSTEEM

Fabrikaat:	Seos Displays, type PRODAS S-600 HiView
Principe:	toont video kleurenbeelden op een sferisch projectiescherm
Projectoren:	BARCO, type Graphics 800
Beeldhoeken:	vrij configurerbaar tot maximaal $250^\circ \times 40^\circ$ of $150^\circ \times 90^\circ$
Beeldluminantie:	10 cd/m ² in het centrum van het scherm
Contrast-ratio:	15:1
Resolutie:	6 bgmin per optisch lijnpaar; 3 bgmin per beeldelement
Geometrie:	beter dan 2% van de beeldhoogte
Convergentie:	beter dan 0,2% van de beeldhoogte
Beeldovergang:	geometrie beter dan 0,5% van de beeldhoogte; luminatiefout kleiner dan 15%
Video input:	standaard video RGB-S lijnfrequentie tot 72 kHz rasterfrequentie tot 100 Hz.

GEÏNTEGREERD TACTISCH INFORMATIE DISPLAY

Fabrikaat:	Silicon Graphics, type IRIS 4D
Principe:	grafische processor, kleur
Resolutie:	1280 \times 1024 beeldpunten bij 15 Hz
Beeldhoek:	$60^\circ \times 45^\circ$
Kleur:	max 1024 kleuren
Video output:	standaard video RGB-S lijnfrequentie tot 72 kHz.

AUDIO DISPLAY

Signaalgenerator

Fabrikaat:	386 PC voorzien van DSP-kaart
Principe:	genereren van complex harmonisch signaal met een frequentiebereik van 50 tot 15000 Hz, d.w.z. de som van n zuivere tonen met frequenties van $k.f_0$, $k=1, \dots, n$ met $f_0=250$ Hz, $n=60$
Niveau:	60 tot 70 dBA (equivalent vrije veld niveau) voor afstanden tot het target tussen 2000 en 20.000 voet
Modulatie:	8,5 Hz aan/uit verhouding 50%.

Head tracking system

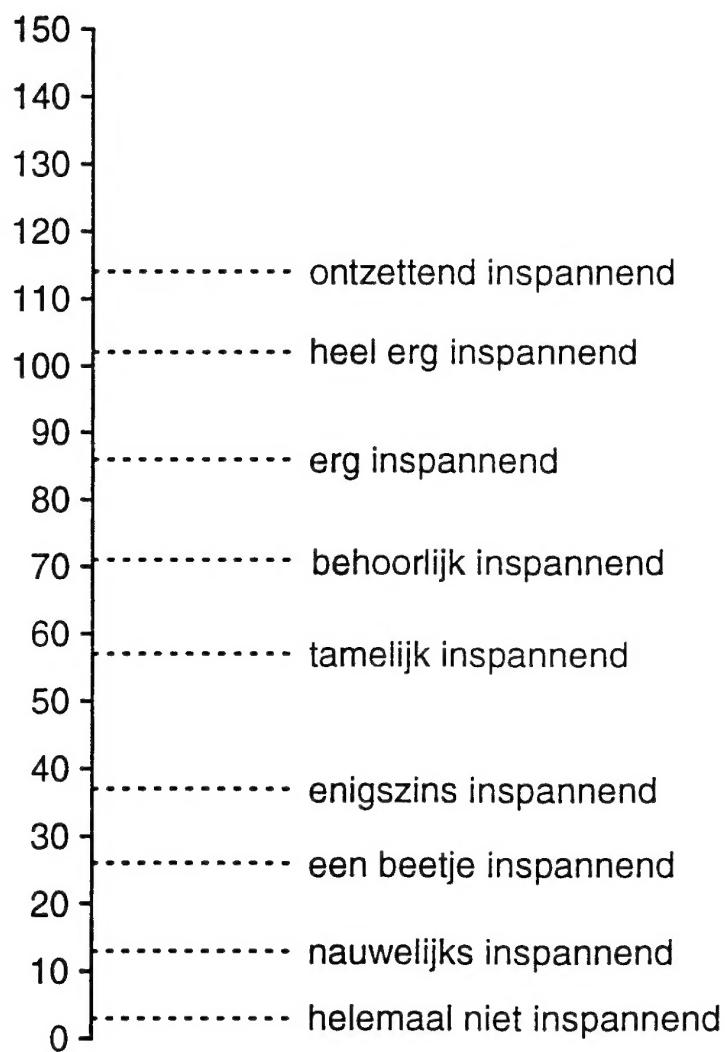
Fabrikaat:	Polhemus, type 3Space Isotrack
Principe:	laagfrequent magnetisch veld
Absolute fout:	positie: 0,33 cm RMS (tot 40 cm van de bron) hoek: 0,85° RMS (tot 75 cm)
Resolutie:	positie: 0,22 cm RMS (tot 40 cm van de bron) hoek: 0,35° RMS (tot 75 cm)
Delay:	ca. 150 ms
Update frequentie:	60 Hz bij binaire gegevensoverdracht via RS-232C ingesteld op 19.2 KBaud.

BIJLAGE 2

Beoordelings-Schaal Mentale Inspanning (BSMI, Zijlstra, 1993)

Inspanningsschaal

Wilt U door middel van het zetten van een streepje op onderstaande lijn aangeven hoeveel inspanning het U heeft gekost om deze taak uit te voeren



BIJLAGE 3 Volgorde waarin de taakcondities zijn aangeboden

Het experiment is in vier blokken afgenoem (2D, 2D met geluid, 3D en 3D met geluid). Binnen elk blok zijn 4 sessies van 20 trials gevlogen met: één doelvliegtuig (1), één doelvliegtuig & visuele dubbeltaak (2), twee doelvliegtuigen (3) en twee doelvliegtuigen & visuele dubbeltaak (4).

De taakblokken en de sessies zijn volgens een latin square over de proefpersonen verdeeld.

proefpersoon	volgorde van de condities															
	2D				2D & geluid				3D				3D & geluid			
1	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	2D & geluid				2D				3D & geluid				3D			
	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3
3	3D				3D & geluid				2D				2D & geluid			
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
4	3D & geluid				3D				2D & geluid				2D			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
5	2D				2D & geluid				3D				3D & geluid			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
6	2D & geluid				2D				3D & geluid				3D			
	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3
7	3D				3D & geluid				2D				2D & geluid			
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
8	3D & geluid				3D				2D & geluid				2D			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
9	2D				2D & geluid				3D				3D & geluid			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
10	2D & geluid				2D				3D & geluid				3D			
	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3
11	3D				3D & geluid				2D				2D & geluid			
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
12	3D & geluid				3D				2D & geluid				2D			
	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1

BIJLAGE 4 Posities waarop het doelvliegtuig werd geplaatst bij de condities met één target. De posities zijn in willekeurige volgorde aangeboden.

verticaal (graden)	horizontaal (graden)															
	150	135	120	90	60	45	30	0	30	45	60	90	120	135	150	180
60				○				○				○				○
30	○		○						○							
0		○		○				○			○			○		○
-30					○		○		○		○	○		○	○	
-60				○			○									

Horizontaal:

0 graden: recht voor het eigen vliegtuig

negatief: links van het eigen vliegtuig

positief: rechts van het eigen vliegtuig

Verticaal:

0 graden: op gelijke hoogte als het eigen vliegtuig

negatief: onder het eigen vliegtuig

positief: boven het eigen vliegtuig

VERZENDLIJST

1. Directeur M&P DO
2. Directie Wetenschappelijk Onderzoek en Ontwikkeling Defensie
3. {
 - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
 - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KL
4. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KLu
5. {
 - Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
 - Plv. Hoofd Wetenschappelijk Onderzoek KM
- 6, 7 en 8. Bibliotheek KMA, Breda
9. Maj. drs. G.J.P. van den Elzen, DPKLu, Afd. Gedragswetenschappen, Den Haag
10. Maj. drs. W. van der Borg, DPKLu, Afd. Gedragswetenschappen, Den Haag

Extra exemplaren van dit rapport kunnen worden aangevraagd door tussenkomst van de HWOs of de DWO.